

北海道電力株式会社然別第一発電所 水車及び発電機に就いて

田中重三* 佐藤文雄**

Waterwheel and Generator for the Shikaribetsu 1st Power Station, Hokkaido Power Company

By Jūzō Tanaka and Fumio Satō
Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The Hitachi's Pelton wheels installed recently at the Shikaribetsu 1st Power Station that was erected on the Shikaribetsu River Exploitation Programme are the largest of this type completed in the postwar period, and are expected to go into actual service quite soon.

In the model test of them the stress was laid on the betterment of bucket performance, and in this view, several shapes of buckets were designed for the purpose of comparison. It should be noteworthy that the model finally adopted had shown the maximum efficiency of 87.5% which means 91.6% for the actual waterwheel. The governor actuator is made to be integrated in one set, and the servomotor is equipped on every waterwheel.

This affords the single drive for each waterwheel while the load does not exceed one half the rated value, thus enabling the installation the so-called high efficiency operation, maintaining high efficiency even for the partial load running.

In the factory test, these Pelton wheels and alternators proved excellent features.

The specifications, construction, and performance of them are described herein by the staff engineers.

〔I〕 緒 言

然別第一発電所用水車は我国に於て終戦後製作されたペルトン水車としては初の大容量機であつて、製作、据付共順調に進捗し昭和 28 年初に送電開始されたものである。

従来ペルトン水車に於ては水車受注に伴い模型水車を製作したことはなかつたが、本水車に於てはその性能を確認するため模型水車を作り、特に新設計のバケットに就き各種実験を行い、立会試験に於てその性能の優秀性が立証された。

〔II〕 計 画 の 概 要

(1) 計 画

本発電所は北海道然別川発電計画の一環として設立されたもので、今迄は然別沼を最上流の貯水池としてこの調整を受けた然別川を十勝川に流域変更し、然別第一、第二、第三の三発電所の新設と共に十勝川の発電所の出力増加を図るものである。この計画による然別沼の利用落差は十勝川二箇地点も含めて約 600 m に及び、沼より放流する一立方メートルの水は約 4,500 kW の電力を発生させる有利な発電計画である。

本発電所は 12 月より翌年 3 月までの渇水期に発電す

* ** 日立製作所日立工場

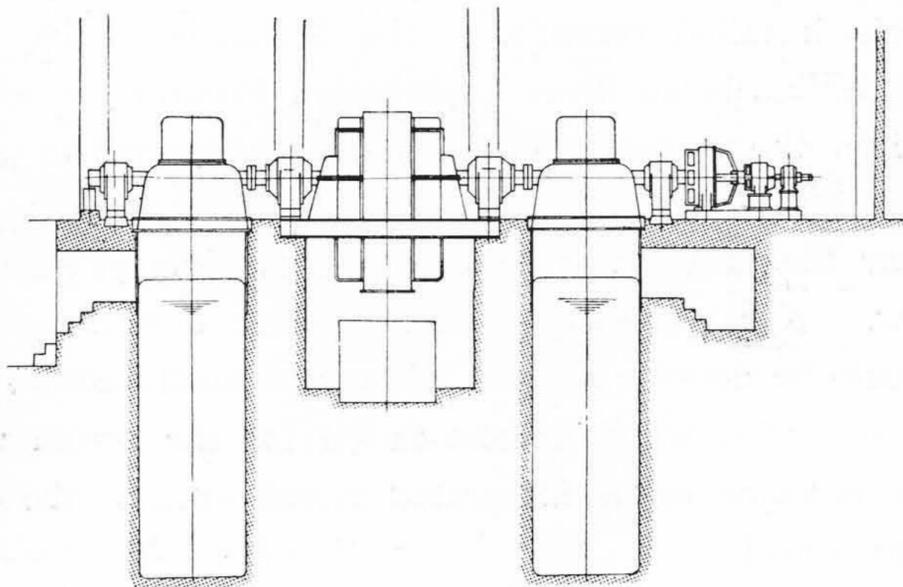
るもので、その他の期間は停止して沼に貯水する。
 利用水深 5.8 m の然別沼より取水する貯水池式発電所
 であつて発電所出力は 13,500 kW である。

(2) 水車仕様

水車は最大出力 14,250 kW であつて、発電機両側に
 各々 7,125 kW の単輪二嘴管ペルトン水車を設けたもの
 である。その仕様は次の通りである。

出	力	最大.....	14,250 kW
		基準.....	14,000 kW
		最低.....	13,800 kW
落	差	最高.....	266.2 m
		基準.....	263.3 m
		最低.....	260.4 m

水	量	最大.....	6.13 m ³ /sec
		基準.....	6.1 m ³ /sec
		最低.....	6.08 m ³ /sec
回	転	数.....	375 r.p.m.
比	較	回	転
		度.....	20.9 m-kW
型	式	.....	2 P ₁ N ₂ -H
台	数	.....	1 台
運	転	方	式
		.....	一人制御式
回	転	方	向
		.....	励磁機側より見て時計式
効	率	水車の保証効率は模型試験に於て最高87.5	
		%を保証している。	
速	度	変	動
		率.....	30%
但	し	、	発
		電	機
		回	転
		部	の
		GD ²	85 T-m ²
		デ	フ
		レ	ク
		タ	ー
		閉	鎖
		時	間
		.....	2.0 sec
		デ	フ
		レ	ク
		タ	ー
		不	動
		時	間
		.....	0.25 sec
		ニ	ー
		ド	ル
		閉	鎖
		時	間
		.....	10~20 sec
		ニ	ー
		ド	ル
		不	動
		時	間
		.....	0.25 sec
水	圧	変	動
		率.....	15%
無	拘	束	速
		度.....	190%



第1図 14,250 kW ペルトン水車据付図

Fig. 1. Plan View of 14,250 kW Pelton Wheel

(III) 模型試験

従来ペルトン水車に就ては新設水車の
 受註に伴い模型水車を製作したことはな
 かつたが、本水車はその性能を確認する
 ため 1/5 の模型水車を作り、水車実験室
 の既設備を利用して実験を行つたもので
 ある。

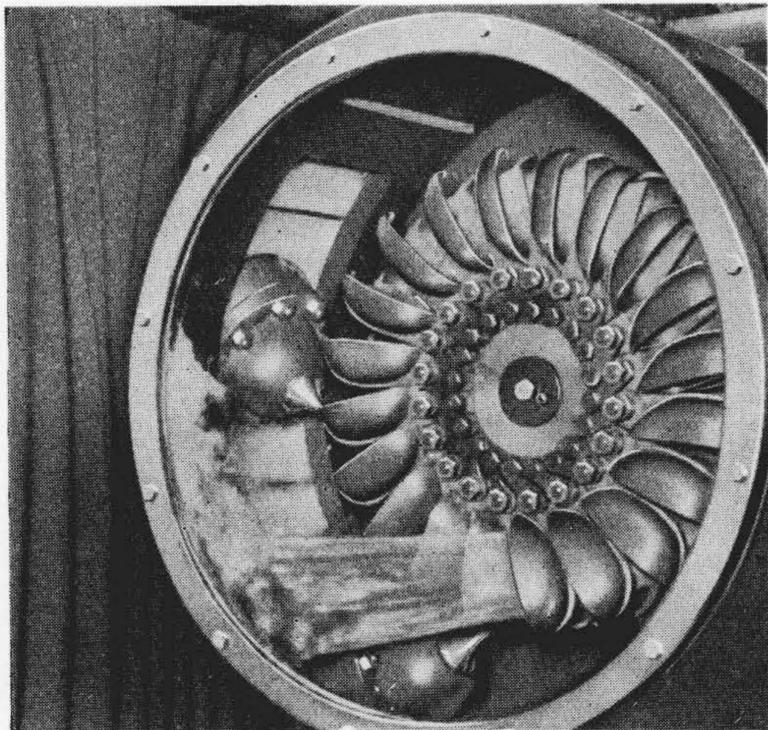
本模型試験に当つては特に性能の向上
 に主眼点を置き新設計の形状のバケット
 を作り、そのディスクへの取付位置、角
 度、ノズル等各種の比較試験を行つた。
 バケット形状の研究にはストロボスコー
 プにより水の流出状態を観察し性能優秀
 なバケットを設計することに成功した。
第2図はこの新しいバケットの停止時の
 噴出状態を示す。この実験の結果本水車
 の模型試験立会の結果は極めて良好な成
 績を収め、これより実物水車の性能の優
 秀性が立証された。

第3図は模型試験結果と保証効率を示
 す。今この模型試験結果の効率を仮にム
 ーデイ式により換算すると、図の如く最
 高効率は 91.6% に達する。後に述べる
 如く本水車は出力 50% 以下は一方の水
 車のみを運転し、高能率運転を行う。こ
 の場合の効率は**第3図**に示す如く部分負

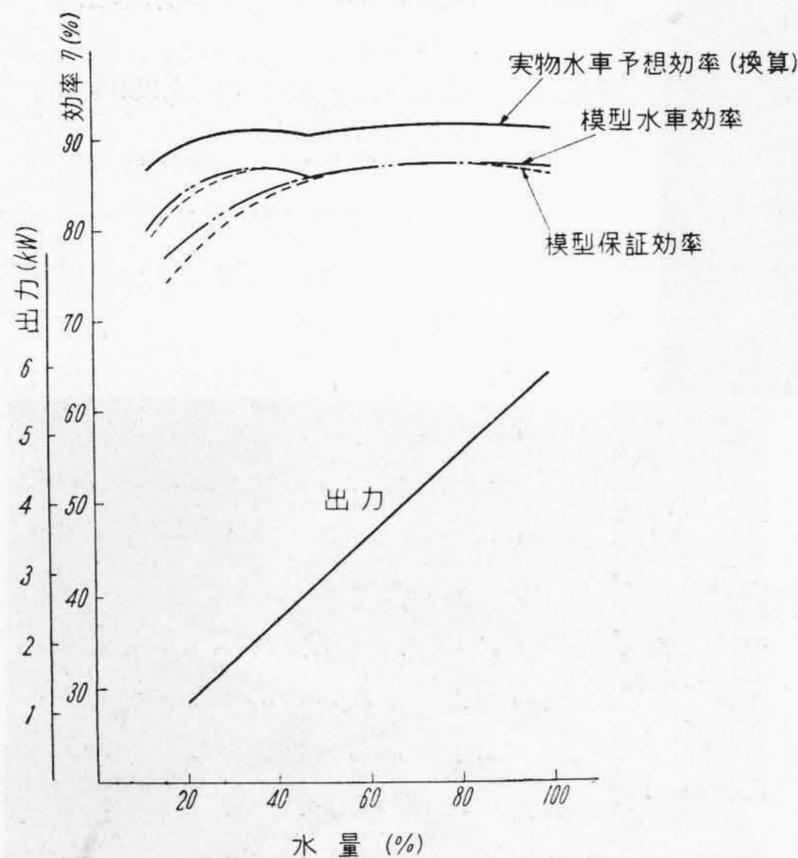
荷に於て非常に高い効率を保ち、常に高い効率で水車を運転することが出来る。

尙模型水車の仕様は次の通りである。

型 式	..... P ₁ N ₂ -H
水 量	..... 0.035 m ³ /sec
出 力	..... 6 kW
回 転 数	..... 510 r.p.m.
落 差	..... 20 m



第2図 模型ランナージェット噴出状況(停止中)
Fig. 2. Jetting Test on the Stopped Model Runner



第3図 模型水車性能曲線
Fig. 3. Efficiency Curve of Model Runner

〔IV〕 構 造

(1) 水 車 本 体

本水車は発電機両側に 7,125 kW の単輪二嘴管のペルトン水車を直結して設けたもので各々に入口弁を有し、ニードル及びデフレクター用サーボモーターも各水車に設けアクチュエーターは両水車に共通に置いた型式である。第5, 6図(次頁参照)はその構造、第5図は工場仮組立の状態を示す。

ケーシングは鋳鋼製で特に模型試験の観察結果からランナーより流出する水により他に悪影響を及ぼさぬようその形状に留意してある。

ペルトン水車の生命たるバケットの材質に就ては特に深い考慮を払い、耐磨耗性の大きいマンガン鋳鋼を使用した。これは特にバケット用として自家工場で鋳造したもので、材料試験によりその機械的強度の優秀なこと、探傷試験により鋳造上の欠陥なきことを確めた。従来バケットが材質、機械的強度の点から亀裂を生じ飛散した例を聞くが、日立バケットに於てはかゝる例はない。構造上バケット二箇を一体とした鋳造法を採用し、遠心力及びジェットによる衝撃に対し強固なものとしてある。内面はゲージに合せグラインダー仕上である。第6図は完成せるランナーを示す。バケットボルトはニッケルクローム鋼製で衝撃荷重に対し絶対安全なものとしてある。

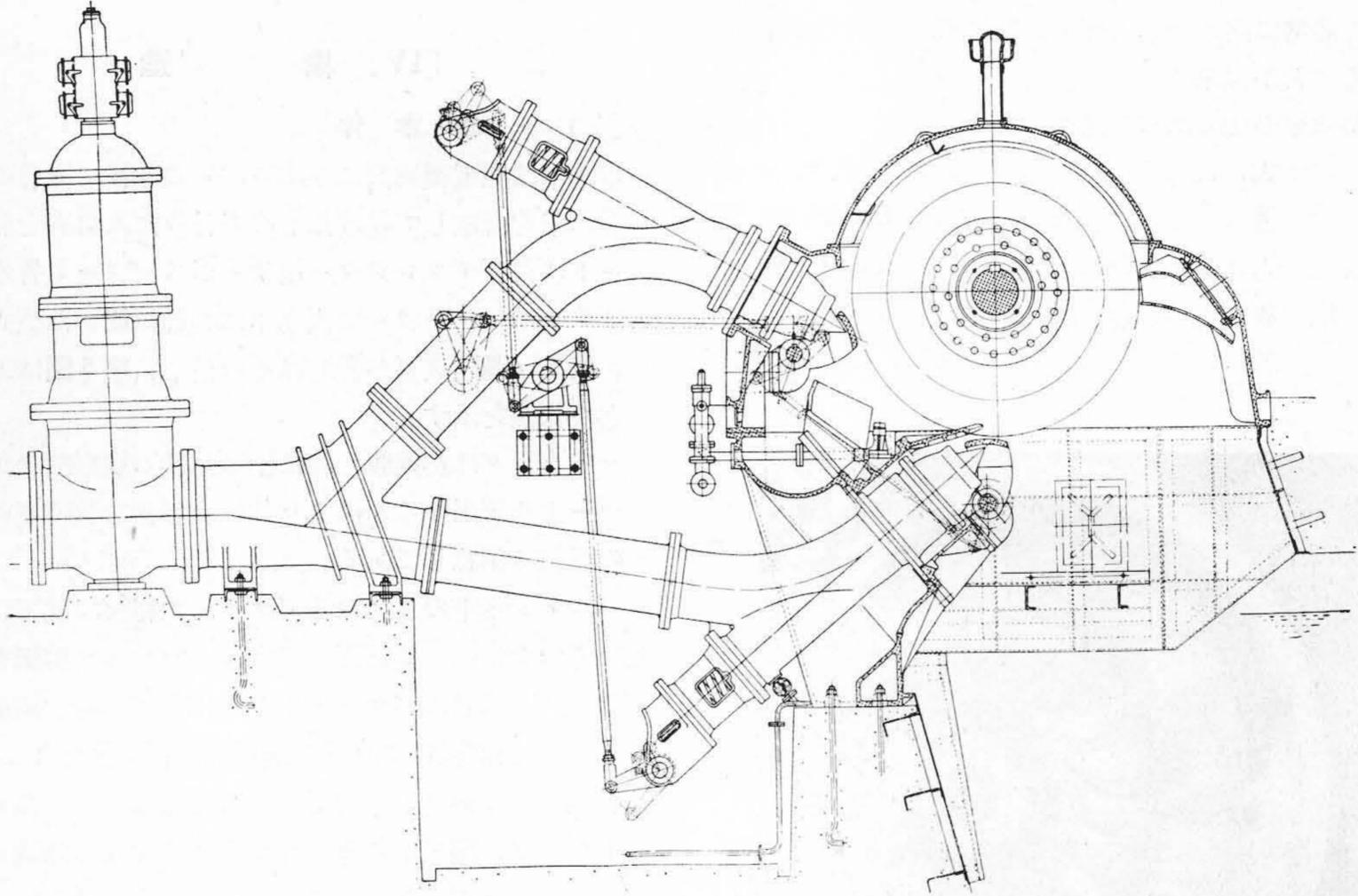
軸受は水冷式でバケット裏金内に銅管を鋳込み直接冷却式としている。油潤滑は油環式である。軸受メダルは球面座にて支持され軸の僅少の撓みに対して応ずるようにしている。ペルトン水車は理論的には軸推力は零であるが、流水その他の多少のアンバランスによる推力に対し安全なように励磁機側軸受を推力軸受としている。軸受メタルには温度継電器、丸型温度計等を附し、不測の事故による温度上昇に対し警報、停止を行う。

ノズルは出口部に不銹鋼鍛造製のリングを附しニードルも不銹鋼鍛造として流水の磨耗に対し十分耐え得るようにした。水圧によりニードル操作桿にかゝる開閉各方向の力は強大なものであり、サーボモーターによる開閉を容易にするため補助スプリングを挿入し、ニードルの如何なる位置に於ても円滑に開閉操作出来るような構造となつている。

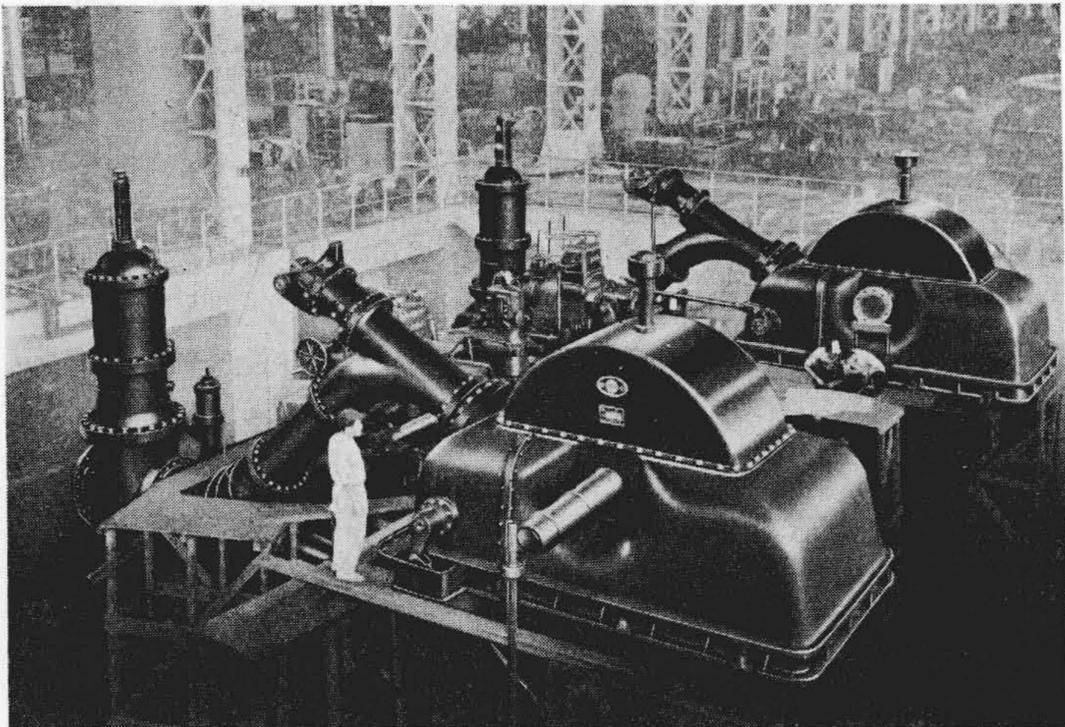
ケーシング下部ピットライナーは運転中のランナーよりの放出水及びデフレクター動作時の高速度の流水に対しコンクリート面を保護する目的で強固に作られ、又マンホール及び内部に点検用足場を設けて、停止時の各種点検に便利にしてある。

(2) 入 口 弁

700φ 油圧式スルースバルブを各水車に一箇設け 18

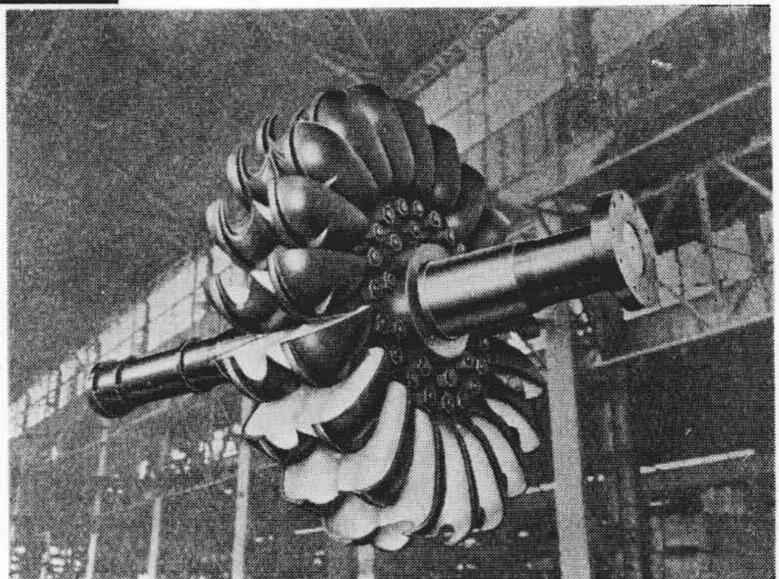


第 4 図 14,250 kW ペルトン水車横断面図
 Fig. 4. Sectional View of 14,250 kW Pelton Wheel



第 5 図 14,250 kW ペルトン水車工場
 仮組立
 Fig. 5. Shop Assembly of 14,250 kW
 Pelton Wheel

第 6 図 14,250 kW ペルトン水
 車ランナー
 Fig. 6. Runner of 14,250 kW
 Pelton Wheel



kg/cm² の油圧により操作させる。脇路弁径は 110φ である。主弁開の場合は先づ脇路弁を開き、ノズルパイプに充水して水圧が落差の 80% になつた時、水圧作用弁により主弁用配圧弁に油圧を通じて主弁を開く、所謂互鍵装置付となつている。操作は自動、手動任意に出来る。弁体は鋳鋼製とし弁軸の摺動部分には発錆及び磨耗を防止するため不銹鋼板を張付けてある。入口弁と鉄管との接続はコンパニオンフランジとし分解に便にしてある。

(3) 調 速 機

調速機は日立 HM 型 50 号電動駆動式である。励磁機軸端の発電機によりスピーダ駆動用電動機を廻す。アクチュエーター部分は一組とし、サーボモーター部分は各水車に一組づゝ設け、各箇に負荷制限装置を附す。万一スピーダ駆動装置に故障を生じスピーダの回転が停止した場合は、ニードルを徐々に閉鎖し水車を停止させ同時に配電盤に表示する。回転は機械式及び電気式回転計により配電盤に表示する。調速機不動時間は 0.25 sec, ニードル閉鎖時間は 10~20 sec, デフレクター閉鎖時間 2.0 sec である。第 7 図はニードル及びデフレクター用サーボモーターを示す。

(4) 圧 油 装 置

圧油装置方式は M-T 式とし常用は電動機駆動、予備は小水車駆動圧油ポンプである。常用油圧は 18 kg/cm² であり 14.0~14.5 kg/cm² で予備ポンプ起動し、12.5~13 kg/cm² に降下した場合に水車を停止する。

圧油槽容量は油ポンプからの油の補給が断たれた場合でも停止油圧になるまでに、調速機サーボモーター全行程を 3 回、停止油圧に於てニードル及びデフレクター 1 行程、入口弁 1 回閉鎖及びジェットブレーキ操作を行うに十分な容量を有している。

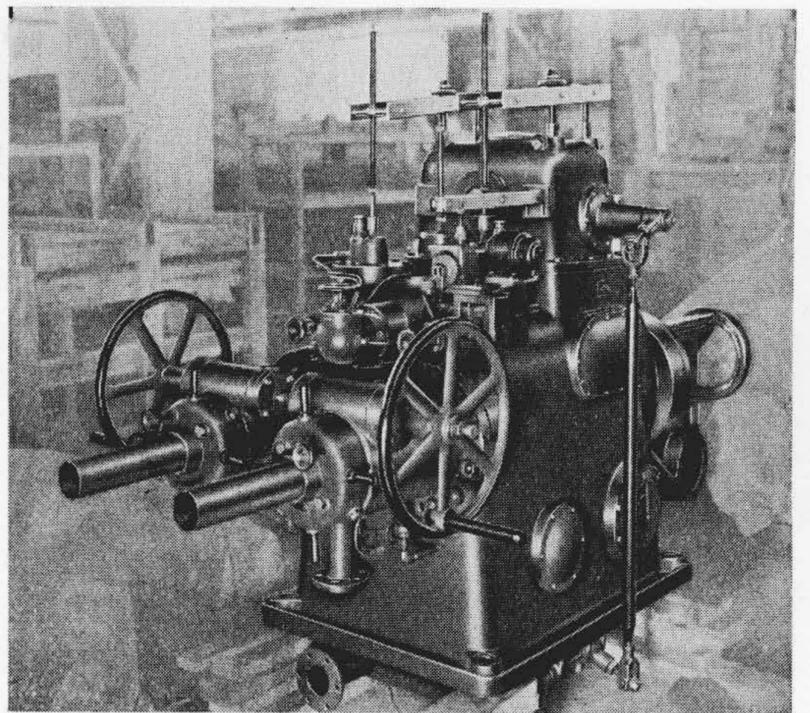
主ポンプは 30 kW, 600 r.p.m. 誘導電動機駆動であり、予備ポンプは 30 kW 横軸ペルトン水車により駆動する。空気補給装置付アンローダーは常用、予備各々のポンプに設け、規定油圧を保つと共に油面を確実に保持する。圧油槽加圧の際空気補給用として 15 HP 堅型空気圧縮機 1 台を設置する。

(5) 運 転 制 御 装 置

本発電所の運転方式は一人制御方式で、その系統図は第 8 図 (次頁参照) の如くである。

(i) 運 転 の 順 序

水車運転順序を簡単に述べると、油圧が規定となり起動条件が満足している時、順序制御器を入口弁開の位置に進めれば電磁弁が附勢され、油圧は側弁配圧弁に通じ側弁開放してノズルパイプが満水となれば、水圧作用弁により主弁は開く。次で順序制御器を起動位置に進め



第 7 図 日立 HMS 型 #50 サーボモーター
Fig. 7. HMS #50 Servo-Motor

れば電磁石 65 S₁ が附勢され、油圧は調速機急停止弁に通じ、1号水車ニードルを無負荷運転の位置まで開き水車は起動する。この時 2号水車ニードルは負荷制限装置により全開位置に抑えられる。順序制御器を励磁の位置に進めれば、界磁遮断器が投入され発電機が励磁される。更に並列の位置に進めれば自動揃速、電圧平衡、同期検定が同時に行われ同期となれば遮断器が投入される。順序制御器を負荷の位置に進めた後はアクチュエーターの負荷制限電動機により任意の負荷をとることが出来る。以上の階段的操作は任意の位置まで一時に進めて自動的に各段階の動作をさせることが出来る。又任意の位置まで逆行させることも出来る。

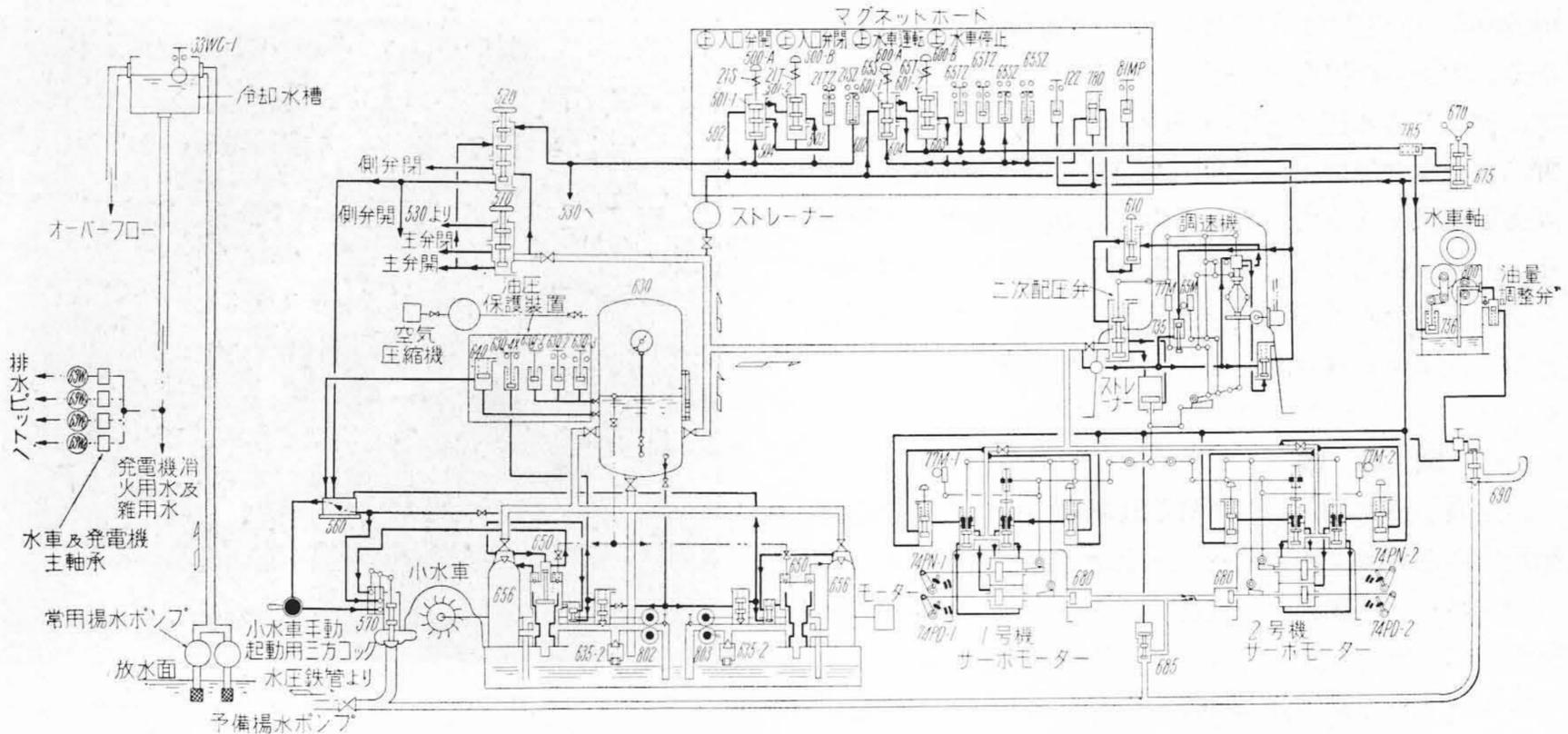
(ii) 高 能 率 運 転 (特 許 申 請 中)

発電機負荷が 50% までは 1号水車のみが運転されるが、50%以上即ち 1号水車全出力以上に負荷を設定するため負荷制限電動機を廻せば、50% で位置開閉器の閉路により、2号水車サーボモーターの負荷制限電動機が開方向に起動して負荷制限を解除し、2号水車ニードルが徐々に開かれる。ここで再びアクチュエーターの負荷制限電動機を操作して所望の負荷を 1、2号機で均等に負荷させる。減荷の場合には 40% で位置開閉器の接点により、2号機の負荷制限電動機が閉方向に動作し、ニードルは全閉となり 1号機のみにて負荷をとる。1、2号の先行機は配電盤の切換スイッチにより任意に定められる。

(iii) 保 護 装 置

水車運転の場合の保護装置は万一の不測の事故に対し十分考慮せられている。

次の場合にはそれぞれ継電器が動作して警報する。
油圧降下、冷却水断水、軸受過熱、給水槽水位低下。



第 8 図 自 動 操 作 系 統 図

Fig. 8. Diagram of One-man Control System

次の場合には水車が急停止する。

a. スピーダー駆動装置故障

運転中アクチュエーター用電動機その他の故障でスピーダーが停止すると、一次配圧弁のパイロットバルブの上動により、開度制限装置の油圧を排除してニードルを無負荷の開きまで閉じ、同時に 81 MP 油圧開閉器の閉路により急停止用継電器が動作して並列を解き、同時にニードル及び入口弁を全閉して水車を停止する。

b. 水車の過速度

水車が常速の 130% に過速せる場合には遠心力開閉器 12 が動作し急停止するが、同時に機械的にも主軸端に設けた過速度防止装置 670 が動作して、通水弁 685 に通ずる圧油を排除して、水圧シリンダー 680 に水圧を通じデフレクターを全閉する。これはペルトン水車のみにある保護装置である。

c. 軸受温度継電器動作 (温度 75°C に上昇の場合)

d. 63Q-3 油圧開閉器動作 (油圧 12.5 kg/cm² に降下の場合)

e. 急停止用引釦開閉器操作

このように保護装置としては万一に備え万全の策が施こされ常に安心して運転保守に当ることが出来る。

〔V〕 交 流 発 電 機

(1) 仕 様

前節で述べた水車に直結される 15,000 kVA 三相交流発電機及び励磁機の仕様は下記の通りである。

交流発電機

台 数	..... 1 台
型 式	..... EFB-RD ₁ (横軸閉鎖通風型)

回転界磁式制動捲線付)

冷却方法	..... 自己通風
出力	..... 15,000 kVA
電圧	..... 11,000 V
電流	..... 787 A
周波数	..... 50 \sim
回転数	..... 375 r.p.m.
極数	..... 16極
力率	..... 0.9 (遅れ)
回転方向	..... 励磁機から見て時計式
主 励 磁 機	
型 式	..... FB ₁ -S _p (横軸開放型他励式)
出力	..... 90 kW
電圧	..... 220 V
回転数	..... 375 r.p.m.
副 励 磁 機	
型 式	..... FB ₀ -K (横軸開放型複巻式)
出力	..... 3 kW
電 圧	..... 110 V

以上の外本機に於ては極めて高い能率、或いは線路充電容量、短絡比等種々の保証をなしているが、例えば全負荷に於ける能率では、力率 1.0 及び 0.9 の両者共保証能率を 0.5% 以上も上廻り、軽負荷に於ては更に保証能率より良くなっている。その他保証事項もすべてを十二分に満足する好成績を収めて完成した。

次にこの発電機の構造の概要を述べる。

(2) 構 造

固定子 鉄損失を少くするため、鉄心は絶縁ワニスを焼付け、焼鈍し、電気熔接銅板製の堅固な匝状の固定子

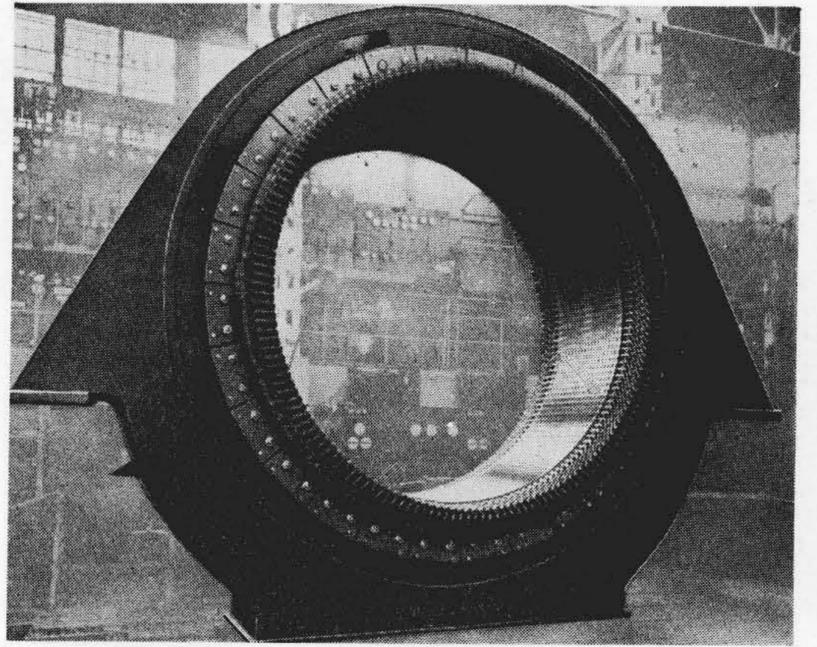
枠に取付ける。鉄心中の空隙を通り線輪及び鉄心を冷却した空気は、一旦固定子枠外周に吐出され、更に外周をめぐって固定子枠の下部の通風孔より風洞を経て発電機室外に吐出される。鉄心の溝は開溝を採用し、溝の中には2層捲亀甲型の固定子線輪を収めてある。固定子線輪の絶縁は J,E,C, のB種とし、マイカペーパーを半重巻にし、コンパウンドを真空注入し、更にマイカペーパーを平巻した後、特殊絶縁ワニスを高温で焼付けてあるため、線輪内には空隙等は絶対に無く、湿気の内部侵入や熱による変形等に対しても極めて安全なものである。工場に於て摘出法によつて一部線輪に対して、ターン間・層間及び大地間の商用周波数による絶縁耐力試験及び衝撃電圧試験、更に損失角の測定等が行われ何れも優秀な成績をおさめた。

固定子線輪が最高温度になると考えられる溝中の上線輪と底線輪との間 12 箇所（内6箇所は予備）に温度測定用埋入抵抗線を挿入し、この埋入抵抗線の口出線を全部纏めて固定子枠外側の端子板に導いているため、発電機運転中何時でも、容易に、且つ安全に発電機固定子線輪の温度を測定出来る。

溝に収めた線輪はベークライト製の楔で堅く保持してある。固定子は輸送に便なるよう二つ割とした。

第9図はこの固定子を示す。

回転子 回転子各部は、直結水車の無拘束速度に対しても十分な安全率を持つよう、特に吟味された材料と長年の経験・研究によつて培われた設計とにより、無駄なく、且つ強度に十分余裕のあるものとした。すなわち、回転子の中心となる主軸は良質の鍛鋼品とし、両端には軸心端よりの打出し鏢を有し、これと水車を直結するようにしてある。継鉄は二つ割鍛鋼製で、直接主軸に焼嵌めした。これ等はいずれも回転子の重量、或いは大なる遠心力を支える重要な部分であるが、その材料はすべて自家工場に鋼塊より製作したもので、原材料製作より仕上げ・組立まで十分な注意と一貫した計画とにより完成されたものであるため、万が一無拘束速度になつたとしても、毫も不安の無いものである。界磁極は積層鋼板を鍛鋼製の極端板と共にリベットで強く締付けて作られている。界磁極頭部には、系統の動揺時に安定度を増し、又单相短絡時の高調波による異常電圧の発生を防止するため制動捲線を設けた。この制動捲線は両端を短絡環により短絡するが、短絡環の位置を磁極鉄心と極極端板との間に設け工

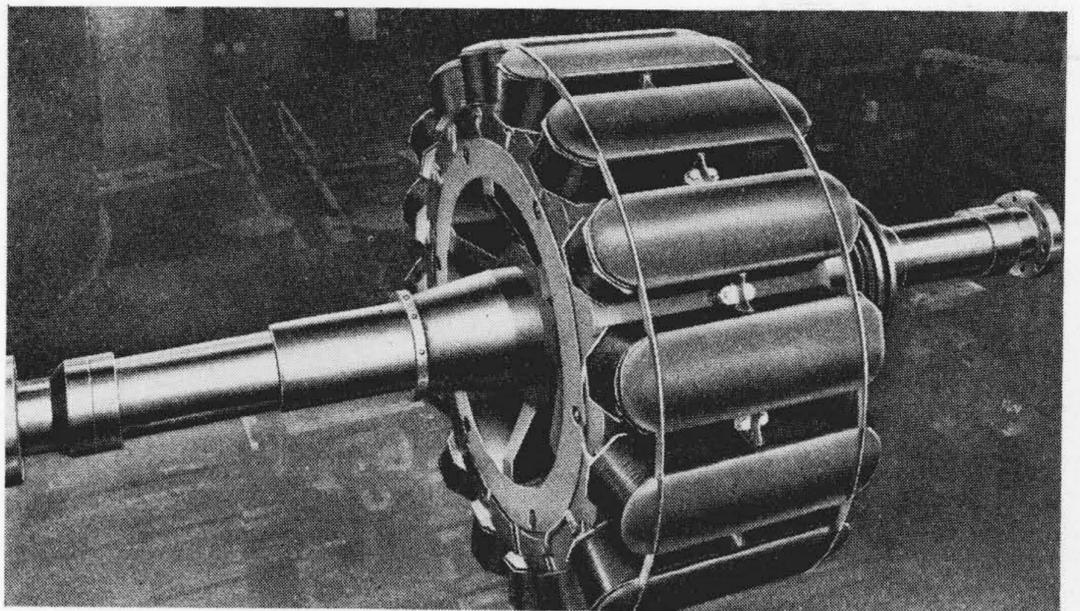


第9図 然別第一発電所用交流発電機の固定子
Fig. 9. The Stator of Alternator for Shikaribetsu Daiichi Power Station

作の簡素化を計つてある。界磁線輪は帯状銅線を平打捲とし、その段間にはマイカペーパーを狭みB種絶縁にしてある。更に絶縁ワニスにより、高温で、無拘束速度に於て生ずる遠心力よりも遙かに強い圧力で強く密着せしめて、長年の運転に対して、線輪の弛緩変形等の無いよう考慮して作られた。第10図はこの回転子である。

その他 軸受は普通の軸頸軸受とし、球面座で支持され、軸の僅少のたわみに対しても安全なように設計製作されてある。給油方式は油環式給油とし冷却は水冷式とした。即ち軸受の中に冷却管を鑄込み、これに冷却水を通じて冷却せしめている。又軸受には温度計素子、警報接点付丸型温度計及び軸受温度継電器等をそなえ、軸受の温度測定や、或る温度以上になつた場合の警報、更に自働停止を行うようにしてある。

発電機の保護のためには、注水式消火装置をそなえて



第10図 然別第一発電所用交流発電機の回転子
Fig. 10. The Rotor of Alternator for Shikaribetsu Daiichi Power Station

いる。これには日立の新案になる普通の噴射式ノズルと螺旋状通路を有する噴霧式ノズルの併用式を採用し、発電機運転中も又停止後も十分なる消火作用をなすよう設計してあり(新案 377487) その際の用水は上水槽から取る事にした。又発火時の非常時には空気の流通を止めるため風洞の出口に近く、エアーダンパを設けた。これは非常用のみならず、運転停止中にこれを閉める事によつて発電機内に湿気の浸入するのを防止する事が出来る。エアーダンパの操作は手動により開閉する外、トリップマグネットにより、配電盤からの遠隔操作も出来る便利なものとした。

発電機の分解、組立用としては、発電機の両側に水車があるためこれも日立の新案になる横軸発電機昇降装置(新案 396251)を取りつけ、水車を分解することなく発電機を分解組立出来る構造とした。

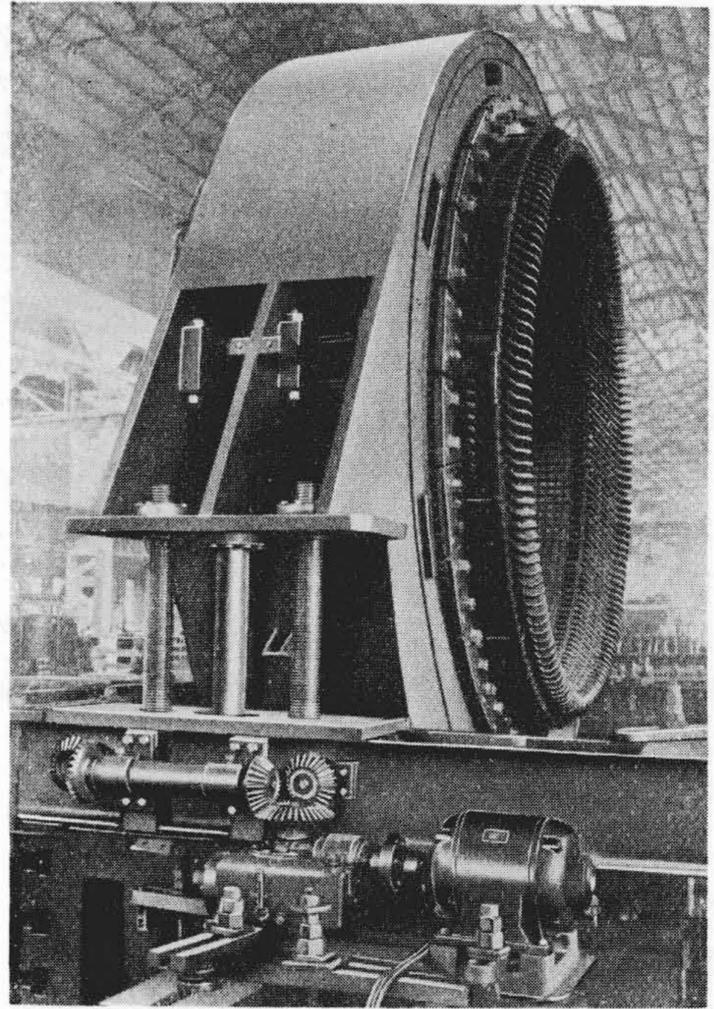
本装置を取りつける事により起重機容量は回転子を吊るに足るだけのものに小さく出来、従つて発電所建屋の建築費及び起重機の費用を著るしく節減出来る。先に東北電力株式会社沼沢沼発電所用発電機に使用して極めて好評を得たものである。すなわち発電機床盤の下に、ウォームギヤー及び発動機等を設置し、電動操作により固定子を約 700 mm 持上げる事の出来るもので、沼沢沼発電所や、本然別第一発電所のように発電機の両軸端に水車若しくはポンプ等を直結した場合に、極めて効果のあるものである。

本装置を使用すれば、発電機解体の際水車を解体撤去する必要なく、僅か片方の水車の外函上部を取はずすだけでよく、又起重機容量は発電機回転子を吊る容量だけ考えればよい。

本装置を使用する事により、然別第一発電所では、その起重機容量は本装置無き場合の 6 割で十分となつた。

第 11 図は固定子昇降装置により、発電機固定子を押し上げた処の写真である。

以上が然別第一発電所用交流発電機の仕様及び構造の概要であるが、これの製作に於ては 15,000 kVA という中容量機を僅か 8 箇月という短い期間に、しかも優秀なる成績をもつて完成したものである。



第 11 図 固定子昇降装置により押し上げられた固定子

Fig. 11. The Stator Lifted by the Stator Lifting Device

〔VI〕 結 言

以上今回設計製作せられた然別第一発電所 14,250 kW ペルトン水車発電機の仕様構造に就いて述べた。ペルトン水車としては戦後初の大容量機であり、その設計に当つては特に各種形状のバケットを試作し、各種の実験を行つて優秀なランナーを採用した。立会試験にも好成績にて合格しその性能の優秀性を認められたことは、日立技術の成果として特筆すべきものである。

本器は昭和 28 年初送電開始されて以来北海道内に於ける一大電力源として活躍している。

終りに本水車及び発電機の工場完成に当つて、色々と御援助下された北海道電力の方々に厚く御礼を申し上げ攔筆する。

